

# СТРУКТУРНАЯ ЭНТРОПИЯ КАК МЕРА НЕОДНОРОДНОСТИ МЕТАЛЛА

*Петрова М.К.*

*Руководитель – проф., д.т.н. Маркова Г.В.*

Тульский Государственный Университет, г. Тула

mk\_petrova@mai.ru

Степень неоднородности и неупорядоченности любой системы описывается изменением структурной энтропии. Изменение энтропии системы определяется следующими факторами:

$$\Delta S = \Delta S_T + \Delta S_{\text{конф}} + \Delta S_{\text{эл}} + \Delta S_{\text{магн}},$$

где  $\Delta S_T$  - температурный прирост энтропии,  $\Delta S_{\text{конф}}$  - изменение энтропии, обусловленное преобразованиями пространственного расположения элементов в структуре металла,  $\Delta S_{\text{эл}}$  и  $\Delta S_{\text{магн}}$  - связаны с происходящими в системе электрическими и магнитными взаимодействиями.

Учитывая, что при рассматриваемых эксплуатационных процессах  $\Delta S_T \rightarrow 0$ ,  $\Delta S_{\text{эл}} \rightarrow 0$  и  $\Delta S_{\text{магн}} \rightarrow 0$ . Изменение конфигурационной части энтропии  $\Delta S_{\text{конф}}$  при эксплуатации может быть связано только с переменным пространственным расположением структурных дефектов (точечные дефекты, дислокации, границы раздела) и формированием новых типов образуемых ими структур:  $S = \Delta S_{\text{конф}} = \Delta S_{\text{стр}}$ .

При образовании дефекта происходит увеличение энтропии этой системы. Появление дефекта приводит к изменению локальных свойств материала. Изменение энтропии можно оценить, используя такие свойства, которые будут чувствительны к структурной неоднородности металла. В частности, в качестве такого свойства можно использовать локальное значение твердости.

$$\Delta S_{\text{стр}} = -R \int_0^{\infty} f(x_i) \ln f(x_i) dx_i$$

где  $x_i$  – локальное значение твердости.

В процессе эксплуатации в нагруженных изделиях происходит изменение не только структуры (перестройка дислокационной структуры, образование дефектов, зарождение и рост микротрещин), вместе с этим изменяются и свойства. Было предложено использовать структурную энтропию для оценки степени поврежденности металла.

Объектами исследования являлись трубная сталь 17Г1С после нормализации со сроками эксплуатации от 1 до 28 лет и сталь рессор

марки 50ХГ после штатной термообработки со структурой троостита с пробегом от 25 до 130 тыс. км.

Проведенный металлографический анализ исследуемых образцов показал, что видимых изменений в структуре не происходит, дефектов в структуре не выявлено.

Измерение твердости проводили по методу Виккерса (ГОСТ 2999-75) при нагрузке 49,03 Н, продолжительность выдержки составляла 10 с, погрешность измерения  $\pm 3$  HV, по 200 измерений на каждом образце.

Статистический анализ полученных данных показал: значения твердости распределяются по нормальному закону, средние значения твердости не зависят от срока эксплуатации, дисперсия твердости возрастает с увеличением наработки (таблица 1).

Таблица 1. Результаты дюрометрического метода

Трубная сталь 17Г1С				Рессорная сталь 50ХГ			
Наработка, лет	$S^2$	СКО	$\Delta S_{\text{стр}}$ , Дж/моль	Наработка, тыс. км	$S^2$	СКО	$\Delta S_{\text{стр}}$ , Дж/моль
1	5,17	2,27	24,060	-	-	-	-
21	8,53	2,93	29,078	25	16,32	4,04	35,095
21	8,99	2,99	31,305	50	21,15	4,59	36,814
19	8,47	2,91	26,228	80	23,84	4,88	37,157
28	14,01	3,74	38,569	90	25,41	5,04	39,627
25	11,16	3,34	35,368	100	26,20	5,12	39,119
25	10,99	3,31	34,324	120	28,33	5,32	40,053
25	13,03	3,61	37,932	130	31,94	5,65	43,897

С увеличением наработки, происходит рост не только среднеквадратичного отклонения (СКО) и дисперсии твердости, но и значений структурной энтропии (таблица 1).

Для большей наглядности построены графики зависимости структурной энтропии от наработки (рис. 1).

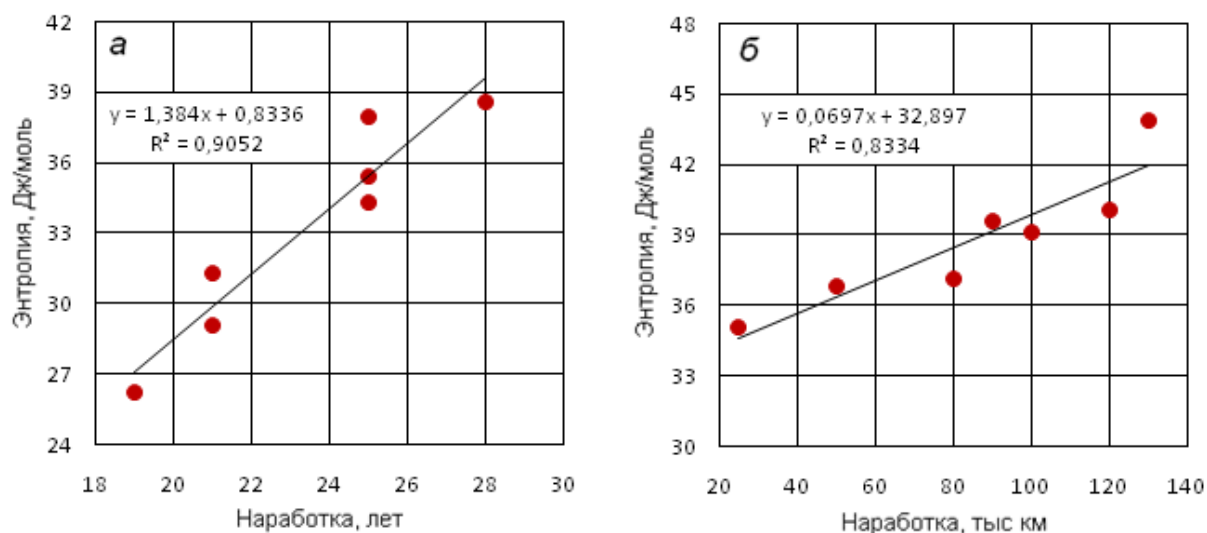


Рисунок 1. Зависимость структурной энтропии от наработки:  
а – для трубной стали 17Г1С; б – для рессорной стали 50ХГ

Таким образом, этот метод чувствителен к «преддефектному» состоянию и при отсутствии видимых изменений в структуре стали может определить еще не сформировавшийся дефект, который нельзя найти другими неразрушающими методами контроля.

*Выводы:*

1. Проведенный металлографический анализ образцов сталей марок 17Г1С и 50ХГ показал, отсутствие видимых изменений в микроструктуре с увеличением наработки.
2. Показано, что дисперсию твердости можно использовать для оценки степени деградации металла мало – и среднеуглеродистых сталей и с увеличением наработки эти значения возрастают.
3. Установлено, что с увеличением наработки, значения энтропии возрастают. Таким образом, структурная энтропия чувствительна к «преддефектному» состоянию материала. С помощью энтропии можно определить тот участок, где еще видимых изменений нет, но изменения в структуре уже происходят.